Alternativas Tecnológicas de Recuperación y Aprovechamiento de Relaves Mineros: Revisión del Estado de Arte

Yuliana Suárez Lozano

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Metalúrgica

Director
Walter Pardavé Livia
Magister en Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales
Bucaramanga
2021

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por la confianza y la oportunidad que me brindaron al permitirme vivir esta experiencia, por acceder a que viajara a una ciudad nueva y afrontara cambios que me permitieron crecer como persona, por apoyarme de manera incondicional en todo lo que les fue posible. Agradecer a mi madre y mi abuela por ser una inspiración constante y un reflejo de la persona en la que me gustaría convertirme, académica, laboral y personalmente, a mi abuela por sus palabras de aliento, franqueza y su apoyo más allá de sus capacidades.

Quiero agradecer a Luis por ser parte de mi proceso formativo como persona y profesional, por inspirarme, creer en mí y su vez hacer crecer una confianza en mí misma, quiero darle las gracias por apoyarme de manera incondicional, por su paciencia y sus palabras en los variados momentos de mi vida, por crecer junto a mí y no soltar mi mano en estos años, infinitas gracias por hacerme parte de tu vida.

Agradecer profundamente a mis amigos y a Dios por ponerlos en mi camino, por vivir en estos 5 años experiencias enriquecedoras y permitirme conocer una amistad sana y llena de apoyo, gracias a Angie, Jennyfer, Gabriela, Darlinson y Laurita, por la ayuda que me brindaron y por mostrarme su aprecio, respeto y confianza, la vida nos juntó y espero conservarlos siempre.

Quiero dar mis sinceros agradecimientos a mi director Walter Pardavé, por brindarme su confianza, conocimiento y su tiempo, por estar atento y permitirme realizar este proyecto de una manera agradable y permitiendo aprender de esta experiencia.

Tabla de Contenido

Introducción 8

1. Objetivos 10

1.1 Objetivo General 10

1.2 Objetivos Específicos 10

2. Pasivos ambientales mineros 11

2.1 Impactos ambientales 12

3. Relaves mineros 16

3.1 Caracterización química, física y mineralógica de diferentes relaves mineros. 16

3.2 Clasificación como relaves metálico y no metálico 19

4. Tecnologías de tratamiento de relaves 21

4.1 Método de activación de relaves mineros 23

4.2 Tecnologías comunes en el tratamiento de relaves mineros 25

4.2.1 Geopolimerización 25

4.2.2 Vitrificación 27

4.2.3 Eliminación de cianuro (Proceso INCO) 27

5. Productos a partir de relaves mineros 27

5.1 Geopolímeros 29

5.2 Materiales para la construcción de vías 30

5.3 Fabricación de adoquines, ladrillos y baldosas 30

5.4 Otros productos fabricados a partir de residuos mineros 32

6. Conclusiones 35

8. Recomendaciones 37

Referencias bibliográficas 38

Lista de Tablas

Tabla 1. *Impactos ambientales de la actividad minera* 13

Tabla 2. *Caracterización química, física y mineralógica de algunos sitios con relaves*..... 17

Tabla 3. *Composición de algunos relaves y tipos de minas.* 20

Tabla 4. *Tecnologías y tratamientos de relaves*..... 22

Tabla 5. *Productos elaborados a partir de relaves mineros* 28

Tabla 6. *Base de datos usada y temas de interés*..... 34

Lista de Figuras

Figura 1. *Pasivos ambientales* 11

Figura 2. *Minas ilegales en zonas de Reserva forestal* 12

Figura 3. *Pasivos ambientales mineros* 15

Figura 4. *Almacenamiento de relaves mineros y zona de cianuración* 18

Figura 5. *Recursos naturales explotados en Colombia* 21

Figura 6. *Esquema de métodos de activación* 24

Figura 7. *Diagrama de flujo sobre la obtención de un geopolimero.* 26

Figura 8. *Hormigón geopolimero a partir de relaves* 29

Figura 9 *Esquema de obtención de ladrillos a partir de relaves mineros* 31

Figura 10**.** *Ladrillos obtenidos a partir de relaves* 32

Figura 11. *Muestra espumas de vidrio a partir de relaves mineros* 33

Resumen

Título: Alternativas Tecnológicas de Recuperación y Aprovechamiento de Relaves Mineros: Revisión del Estado de Arte

Autor: Yuliana Suárez Lozano

Palabras Clave: Relaves mineros, pasivos ambientales, tecnologías de recuperación, minería.

Descripción: Esta revisión comprende el denominado estado del arte "Alternativas Tecnológicas de Recuperación y Aprovechamiento de Relaves Mineros", el cual está enfocada en sintetizar los diferentes métodos que pueden ser utilizados para recuperar y dar una utilidad a los relaves o residuos mineros, y de esta manera minimizar gran parte de los pasivos ambientales generados por esta industria.

Los relaves pueden generar problemas serios que derivan en consecuencias directas a la salud, por lo que buscar alternativas tecnológicas enfocadas en cada tipo de relave o residuo minero, resulta fundamental actualmente, de manera que se pueda minimizar el impacto ambiental y el riesgo a la salud. Las tecnologías de recuperación pueden lograr disminuir el riesgo de contaminación y el uso de espacios destinados a la contención de estos, los cuales van en aumento, debido al incremento en la minería a nivel global y a gran escala, así mismo el aprovechamiento de los relaves es fundamental, dándoles una utilidad siendo usados como materia prima o adicional en un proceso, disminuyendo la necesidad de usar materiales adicionales al ser reemplazados por los obtenidos en los tratamientos de los relaves, residuos o directamente estos, de manera que se les brinda un valor agregado.

Por esta razón durante la revisión bibliográfica se indagó sobre los pasivos ambientales, tipos de relaves, su caracterización y composición, así como los diferentes impactos que se pueden generar a los medios físicos, bióticos y sociales.

Como conclusión se indica que diversos productos se han elaborado, tales como baldosas, ladrillos, adoquines, pasta cementosa, espumas de vidrios, geo polímeros, entre otros, con diversas tecnologías como alternativas probadas para la recuperación y aprovechamiento eficiente de los relaves, por los múltiples autores consultados por esta revisión del estado del arte.

---

[*] Proyecto de grado

[**] Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Walter Pardavé Livia, Magister en Ingeniería Metalúrgica.

Abstract

Title: Technological Alternatives for the Recovery and Use of Mining Tailings: Review of the State of the Art

Author: Yuliana Suárez Lozano

Key Words: Mining tailings, environmental liabilities, recovery technologies, mining.

Description: This review includes the state of art called "Technological Alternatives for the Recovery and Use of Mining Tailings", which is focused on synthesizing the different methods that can be used to recover and give a utility to tailings or mining wastes, and thus minimize a large part of the environmental liabilities generated by this industry.

Tailings can generate serious problems that lead to direct health consequences, so looking for technological alternatives focused on each type of tailings or mining waste is currently essential, so that the environmental impact and health risk can be minimized. Recovery technologies can reduce the risk of contamination and the use of spaces intended to contain these, which are increasing, due to the rise in mining activity at a global level and on a large scale, likewise the use of tailings is fundamental, giving them a utility being used as raw or additional material in a process, reducing the need to use additional materials when they are replaced by those obtained in the treatment of tailings, waste or directly these, this way added value is provided .

For this reason, during the bibliographic review, were investigated the environmental liabilities, types of tailings, their characterization and composition, as well as the different impacts that can be generated to physical, biotic and to social environments.

As a conclusion, it is indicated that various products have been elaborated, such as tiles, bricks, paving stones, cement paste, glass foams, geopolymers, among others, with various technologies proven as alternatives for the recovery and efficient use of tailings, by the multiple authors consulted for this review of the state of art.

---

*Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: : Walter Pardavé Livia, Master in Metallurgical Engineering.

Introducción

En los últimos años el sector minero ha registrado un crecimiento en el país, lo que genera un aumento en el producto interno bruto de la nación (PIB), registrándose un aporte de este campo del 5,4% al PIB nacional para el primer trimestre del 2019, y aportando 150.000 empleos directos en el país (Mintrabajo, 2019).

EL sector minero procesa grandes cantidades de minerales al año, las cuales son aprovechadas como materias primas para diferentes industrias, este proceso de extracción y obtención genera grandes cantidades de relaves mineros, los cuales son un gran desafío para las industrias mineras, debido a que muchas empresas reconocen que no cuentan con una solución integral, ya que estos subproductos no son dispuestos o tratados de una forma adecuada y muchas veces son almacenados sin supervisión posterior que garantice su estabilidad y seguridad (Friess & Brotz, 2011); Los relaves mineros están constituidos de diversos elementos y compuestos que formaban parte de la composición del suelo o fueron agregados durante las actividades del proceso, entre los cuales los más comunes suelen ser: roca molida, agua, minerales, metales pesados y químicos como cianuro, plomo, cadmio, zinc entre otros (Medvinsky-Roa, G. ;Caroca, V; Vallejos, 2015). En la actualidad se manejan diversas técnicas o alternativas que permite darle una segunda vida a los relaves mineros o en su defecto un tratamiento que disminuya el potencial peligro de contaminación, esto debido a la ausencia o disminución de espacios disponibles para su disposición y los daños medioambientales que puede generar una mala técnica para descartar o almacenar estos productos (Beltrán & Rodríguez, 2018).

A lo largo de esta investigación se recopilaron diferentes métodos y tecnologías para el aprovechamiento de los relaves mineros, de manera que sea posible plantear distintas posibilidades para los diferentes productos que se pueden obtener en este sector, obteniendo no solo un ingreso económico adicional para la industria, sino también una reciclado y disminución en la cantidad de elementos que puedan afectar el medio ambiente, esto por medio de la revisión bibliográfica de diferentes autores.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar revisión del estado de arte de las tecnologías de recuperación y reciclado de componentes valiosos a partir de relaves mineros, mediante series cronológicas y evolución de procesos y productos.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterización química, física y mineralógica de diferentes relaves mineros de acuerdo a la revisión de literatura científica
- Identificar los métodos, procesos y alternativas tecnológicas para la recuperación y reciclado de diversos productos con contenido valioso en los relaves mineros.
- Proponer diversos flujogramas con balance de materia de procesos de recuperación y reciclado de materiales valiosos a partir de residuos mineros mediante literatura técnica.

2. Pasivos ambientales mineros

Los pasivos ambientales mineros (PAM) son definidos en estudios de la Comisión Económica Latina y el Caribe como las instalaciones, los efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos generados por las operaciones mineras que se encuentran en la actualidad inactivas o abandonadas, las cuales constituyen el conjunto de impactos prejudiciales y permanentes sobre el medio ambiente, población y propiedad cercana, esto puede variar según el país en el cual se realice el proceso, así como la responsabilidad sobre la gestión de los pasivos ambientales debido a las diferentes legislaciones que radican en cada nación (Oblasser, 2016), lo mencionado es posible observarlo en la Figura 1 donde se pueden se aprecian arenas con cianuro y mercurio ubicadas en el municipio de vetas, además de minería realizada en la ladera de un rio. En la actualidad las nuevas tecnologías buscan darles un manejo más adecuado a los relaves mineros, de esta manera minimizar los pasivos provenientes de las estructuras de deposición convencional (Beltrán, 2018).

Figura 1

Pasivos ambientales a) Arenas con cianuro y mercurio (Au- Ag) Vetas, Santander b). Minería de Au en la ladera de un río



2.1 Impactos ambientales

La contaminación de cuerpos acuíferos como los ríos, lagunas y aguas subterráneas a causa de los metales pesados, filtraciones de ácido provenientes de la exploración minera, además de la contaminación del suelo que generan daños graves al ecosistema expuesto, alterando físicamente el paisaje con edificios y plantas abandonadas, pozos abiertos, perdida de vegetación y huecos, llegando a afectar actividades productivas como la agricultura y la piscicultura, (Arango & Olaya, 2012; Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017), generando impactos socioeconómico ligados directamente con los impactos ambientales. En la Figura 2, se evidencia una reserva forestal afectada por la minería ilegal, estos residuos mayormente sólidos, que están compuestos principalmente de relaves y roca estéril, suelen arrojarse a ríos o depositarse en zonas convenientes para el proceso, como en construcciones tipo presa realizadas en valles, esto implica la ocupación de grandes zonas de depósito, las cuales una vez son ocupadas por completo o se produce el cierre de la mina, se convierten en pasivos ambientales importantes (Arango & Olaya, 2012; Beltrán et al., 2018) que bajo ciertas condiciones de interacción con el ambiente pueden llegar a liberar contaminantes al mismo que perjudican la salud de las poblaciones del área, esto es posible observarlo en la Tabla 1, en la cual se recopilan los impactos principales de la actividad minera.

Figura 2.

Minas ilegales en zonas de reserva forestal.



Nota. Minería ilegal al sur de Bolívar. Tomado de (ElTiempo, 2016) .

Tabla 1

Impactos ambientales de la actividad minera

Sistemas	Componente	Impactos	Actividades que generan el impacto
Medio físico	Suelo	• Hundimientos del terreno • Erosión sobre botaderos de estéril (rocas encajantes y residuos de la operación de lavado del cabrón)	Fase de exploración. • Adecuación, construcción y operación de campamentos y helipuertos. • Utilización y adecuación de accesos • Apertura de trincheras y apiques. • Pozos y galerías exploratorias. • Perforación.
	Agua	• Contaminación química de las aguas • Sedimentos • Incremento de turbidez • Disminución de los caudales • Alteración del curso de los cauces	
	Aire	• Alteración por emisión de gases • Emisión de partículas • Ruido	
	Paisajes	• Alteración del relieve • Disminución de calidad	
Medio Biótico	Flora	• Remoción de vegetación • Deforestación	Fase de exploración. • Construcción y montajes • Perforación y voladura • Remoción de estériles en minería a cielo abierto • Extracción del mineral en minería a cielo abierto • Disposición de escombros • Cierre y abandono
	Fauna terrestre	• Alteración del hábitat • Migración de especies • Disminución de especies	
Medio Social	Demográfico	• Mayor nivel de empleo • Incremento en el número de habitantes (flujos migratorios y desplazamientos)	
	Económico	• Incremento en el nivel de ingresos per cápita • Mayor nivel de consumo • Valoración de los predios • Regalías	
	Patrimonio Cultural	• Cambio de costumbres	

Nota. Los diferentes impactos ambientales a partir de las Guías Minero Ambiental (exploración y explotación) del MME y MMA. Tomado de *La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica* (P. 4) por (M. López et al., 2018).

Como se mencionó anteriormente en la Tabla 1 se recopila los componentes afectados del medio físico, biótico y social, así como los diferentes impactos que se pueden presentar durante las variadas actividades que se llevan a cabo entre la apertura y cierre de la mina, he incluso tiempo después de su cierre, ya que minas abandonadas representan gran parte de la generación de contaminantes a los medios mencionados, y aunque se observen actividades beneficiosas para la población, como lo es un incremento económico, este solo será posible y duradero si la empresa encargada de la explotación minera implementa un desarrollo sostenible y metas de restauración y prevención para la elaboración del proyecto (Guzmán Martínez et al., 2020; M. López et al., 2018).

Los pasivos ambientales mineros (PAM) se pueden clasificar de diversas maneras, según la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI) se clasifican como instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, tramos de causes perturbados, depósitos de residuos mineros, minas abandonadas, entre otros. Entre los depósitos de residuos se encuentran según la (ASGMI): Los relaves, residuos de lixiviación, residuos de evaporación/ precipitación, desmonte, botadero, escorias, residuos industriales, otros acopios, en la Figura 3 se muestra una cantera de recebo y residuos de la minería de granito, los cuales se encuentran a cielo abierto y por ende expuestos directamente al medio ambiente (Guzmán Martínez et al., 2020).

En la actualidad se producen miles de toneladas de desechos minerales en todo el mundo, los cuales hacen parte de un porcentaje importante en los pasivos ambientales, con cantidades de millones de toneladas de depósitos de suelos, relaves de minas y roca de desecho (Xie & van Zyl, 2020),. Algunos pasivos ambientales pueden contener metales pesados y reactivos o presentar en pH acido, esto puede generar problemas ambientales irremediables; Por lo anterior resulta preocupante cuando se presenta un mal manejo o un nulo procedimiento (Barcelos et al., 2020;

Saedi et al., 2020), en Colombia este problema llega a ser mucho más grave debido a la informalidad minera, y la falta de una legislación más eficiente. Al igual que en otros países de Latinoamérica, Colombia dispone de la Red latinoamericana de prevención y sitios contaminados (ReLASC) que brinda una base normativa orientada a la identificación, evaluación, caracterización y remediación de áreas contaminadas que ayudan a contener, remediar e identificar las posibles fuentes de contaminación, lo complicado de la situación en Colombia es que no se lleva una contabilidad ambiental oficial que nos permita conocer y valorar los pasivos ambientales, por esta razón el ministerio de minas realizó una convocatoria para la realización de un proyecto que permitiera caracterizar, priorizar y valorar económicamente los PAM pero hasta la fecha no se conocen los resultados de este estudio de parte del ministerio de minas (Arango & Olaya, 2012; Duarte Duran & Piñeros Pirazán, 2017; M. López et al., 2018).

Figura 3

Pasivos ambientales mineros, minería de granito y recebo



Nota. En las imágenes se pueden apreciar pasivos ambientales comunes, en la imagen a) Minería de granito y en la imagen b) Cantera de recebo

En la figura (3) anterior se observan ejemplos de pasivos ambientales, estos se encuentran entre los más comunes y los cuales se pueden observar a simple vista, entre estos están, los

botaderos, relaves, así como superficies afectadas por vertidos, en la imagen a se aprecia minería de granitos y materiales de construcción, mientras que en la imagen b una cantera de recebo.

3. Relaves Mineros

Entre los pasivos ambientales se encuentran los relaves mineros, estos son residuos compuestos por una mezcla de mineral molido, agua y otros compuestos como químicos solubles y agentes de lixiviación producto de la extracción y procesamiento de minerales (Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017; Saedi et al., 2020). Dado el aumento de la minería en la última década, existe la preocupación sobre el destino de los relaves mineros y los daños ambientales que pueden ocasionar, estas corrientes son dispuestas sobre superficies topográficamente convenientes o en estructuras de contención tipo presa, en algunos casos son desechadas de manera incorrecta ocasionando daños irreparables (Beltrán, 2018). En la actualidad se producen miles de toneladas de desechos minerales en todo el mundo, estimándose una cantidad que supera los 10 mil millones de toneladas de depósitos de suelos, relaves de minas y roca de desecho, estos relaves suelen poseer tamaños de grano fino (1 a 600 μm) (Saedi et al., 2020; Xie & van Zyl, 2020).

3.1 Caracterización química, física y mineralógica de diferentes relaves mineros.

Los relaves suelen contener metales pesados y reactivos que fueron agregados en las diferentes etapas del procesamiento de extracción, lo que puede llegar a ser peligroso cuando se presenta un mal manejo o una falla de contención que generan la formación de efluentes de minerales ácidos y fugas de metales pesados ocasionando graves afectaciones al medio y la población circundante, por esta razón es importante caracterizar las minas, ya que cada mina es diferente y cada relave producida por esta. En la Tabla 2 se puede observar la caracterización

química, física y mineralógica de los relaves obtenidos de diferentes extracciones mineras, esta información es recopilada de diferentes autores (Barcelos et al., 2020; Saedi et al., 2020), y en la Figura 4, imagen a) se denota un almacenamiento de relaves en el municipio de Vetas Santander, Colombia, en la imagen b una zona que se encuentra destinada a la cianuración.

Tabla 2

Caracterización química, física y mineralógica de algunos sitios con relaves

Relaves	Química	Física	Minerales
Minería de Oro y Plata, Empresa Minera Agro-Industrias el corazón, Quito, Ecuador. (Jácome Calderón, 2020)	~40,41% Si, ~3,6% Al, 0,29% K, 1,39% Fe, 0.59% Ti	Peso específico: promedio 2.6 g/cm3 Granulometría: ≤ 0.42 mm % Humedad: promedio 18.82%	SiO_2, Fe_2O_3, TiO_2, Caolinita, Moscovita y Grupo plagioclasas
Minería de Cobre, Minera CANDEL IV, Arequipa, Perú. (Merma & Churata, 2015)	60,04% SiO_2, 14,29% Al_2O_3, 12,54% Fe_2O_3, 4,04% Cao, 2,82% MgO, 1,59% K_2O, 0,63% TiO_2, 1,04% CuO, 1,47% SO_3, 0,45% Cl_2O y 1,09% MnO	Solido pulverulento color verde plomizo. Granulometría: mayormente <0.35 mm % Humedad: ≤ 2.1	SiO_2, $FePO_4$, Hidróxido de aluminio con oxido de silicio, fosfato de cobre trihidratado, Clorita, Hidróxido, silicato de Aluminio, Hierro, Magnesio y Sodio, Moscovita - 3T Y Fosfato de titanio.
Minería de Talco e hidróxido de aluminio, Finlandia. (Karhu et al., 2020)	38,5% MgO, 10,1% SiO_2, 8,2% Fe_2O_3, 0,8% CaO, 0,61% Al_2O_3, 42,7% LOI	Solido pulverulento. Granulometría: < 0.14 mm	Magnesita, talco, clorito, dolomita y sulfuro de hierro
Minería de carbón, Planta Tunçbilek, Istanbul-Turkey (OruÇ & Sabah, 2006)	40,75% SiO_2, 30,35% LOI, 15,04% Al_2O_3, 6,40% Fe_2O_3, 0,30% Na_2O, 2,48% MgO, 2,28% K_2O, 2% CaO, 0,70% TiO_2	Granulometría: ≤0,18 Densidad de la pulpa: 1,038 g/cm3 Pérdida por ignición: 30% PH: 8,3	Minerales principales: Caolinita, Ilita, cuarzo, moscovita, montmorillonita y materia orgánica (carbón)

Nota. Recopilación de caracteriscas de relaves provenientes de diferentes explotaciones mineras. Adaptado de (Jácome Calderón, 2020; Karhu et al., 2020; Merma & Churata, 2015; OruÇ & Sabah, 2006).

Figura 4

Almacenamiento de relaves mineros y zona de cianuración (2020)



Nota. En las imágenes se pueden observar relaves producto de la minería, en la imagen a) se observa un aalmacenamiento de relaves y en la imagen b) Zonas de cianuración ubicadas en el municipio de Vetas Santander.

En Colombia la información a la cual se puede acceder sobre los relaves en Colombia es limitada y dispersa, a pesar de que la minería en Colombia es una de las actividades más importantes económicamente hablando y las regulaciones establecidas no son de mucha relevancia para el sector minero del país, por lo anterior realizar un seguimiento de los relaves y su almacenamiento es complejo. Cada mina es diferente, por lo que los relaves y las rocas obtenidas, así como el manejo de los mismos será igual de variado, las características químicas varían ampliamente de un yacimiento a otro así como sus propiedades geoquímicas, por esta razón la caracterización de los relaves permitirá conocer y establecer mecanismos de contención y posibles aprovechamientos usando las tecnologías emergentes para el manejo de estos relaves, permitiendo reciclar y generar un beneficio ambiental y posiblemente económico (Beltrán et al., 2018; Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017; Saedi et al., 2020).

En la Tabla 2 se observa la caracterización que pueden tener algunos relaves, estos relaves provienen de minas que extraen minerales y elementos diferentes. El relave que proveniente de la empresa Minera Agro-Industrias El Corazón, ubicada en Ecuador, la cual se encarga de extraer oro y plata, fue posible encontrar en la caracterización química elementos como silicio, aluminio, hierro, titanio, entre otros, por otro lado, los minerales presentes en la muestra fueron oxido de silicio, óxido de hierro (Fe_2O_3), caolinita y oxido de titanio. Para el relave proveniente de la minería de talco e hidróxido de aluminio, se observaron elementos como magnesio, silicio, calcio, hierro y minerales de magnesita, talco, clorito, dolomita y sulfato de hierro. Con lo anterior es posible identificar las diferencias, pues sus propiedades químicas, mineralógicas y físicas dependerán de la mina y del método usado para hacer la extracción, dando como resultado relaves con características, propiedades y apariencias diferentes (Jácome Calderón, 2020; Karhu et al., 2020).

3.2 Clasificación como relaves metálico y no metálico

Los relaves pueden ser clasificados según su naturaleza elemental, como se observa en la Tabla 3, entre estos se encuentran incluidos algunos relaves de la minería más común, estos están separados como metálicos y no metálicos, así mismo se encuentran anexados los compuestos que pueden ser hallados en los relaves dependiendo del tipo de mina del cual fueron extraídos, esta tabla ayuda a visualizar y sintetizar esta información que puede ser valiosa para la elección de métodos o alternativas de recuperación y aprovechamientos de estos relaves.

Tabla 3

Composición de algunos relaves y tipos de minas.

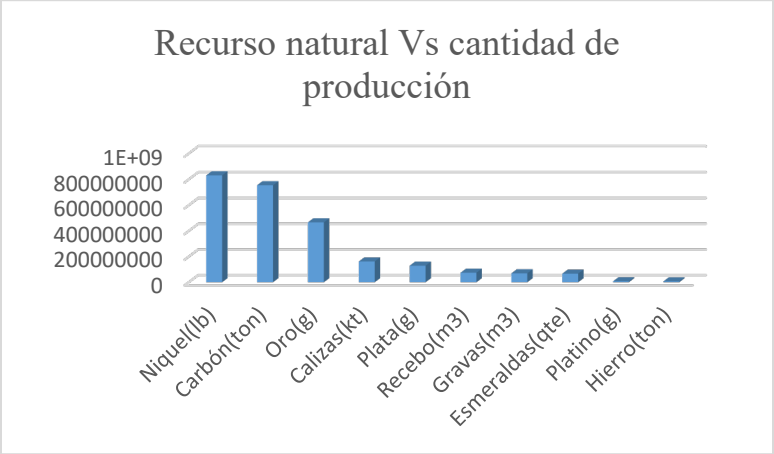
	Compuestos de los relaves	**Tipos de minas**
Relaves metálicos	TiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, Na_2O, MgO, SiO_2, CaO, V_2O_5, K_2O SO_3	Minas metálicas (hierro, manganeso, vanadio y cromo)
	Al_2O_3, Na_2O, TiO_2, CaO Fe_2O_3, MgO, SiO_2, V_2O_5, CuO, K_2O, P_2O_5, SO_3, MnO.	Minas de cobre, zinc, níquel, estaño, magnesio, mercurio, aluminio, cobalto, bismuto, molibdeno, plomo
	SiO_2, cuarzo, Al_2O_3, K_2O, carbonato de calcio, Sulfato de calcio, Moscovita, Albita y microclina	Metales preciosos (Oro, plata, paladio, osmio, platino y rutenio)
	TiO_2, Na_2O, MgO, Cr_2O_3, SiO_2, Al_2O_3 K_2O, CaO, Fe_2O_3.	Sulfuro y materiales de construcción (Minas no metálicas
Relaves No Metálicos	Cuarzo, clorita, calcita, caolinita, Feldespatos, dolomita e Ilita	Minas de Carbón

Nota. Composición de algunos relaves provenientes de distintos tipos de minas. Adaptado de (Saedi et al., 2020)

Según Portal Único del Estado Colombiano gov.co, el cual funciona como base de datos del país y brinda información recopilada de más de 800 páginas del gobierno, fue posible visualizar mediante los datos abiertos la información presentada en la Figura 5, la cual corresponde a los recursos naturales explotados en Colombia por cantidad de producción, mostrando el carbón encabeza la lista, seguido del níquel, oro y caliza, teniendo en cuenta las unidades de medida, esta información es recopilada desde el año 2012 hasta el primer trimestre del 2021, siendo el níquel y el carbón los que mayor beneficio generan al país y los exportados tradicionalmente por excelencia (R. Rodríguez et al., 2009). Como se observa en la Tabla 2 cada uno de estos principales materiales extraídos, proceden de un tipo de mina diferente, lo que generarán diferentes tipos de relaves en el país, brindándonos una amplia gama y formas para aprovechar estos productos obtenidos de la explotación.

Figura 5.

Recursos naturales explotados en Colombia



Nota. Recursos naturales por cantidad de producción *Adaptado de* (Base de datos Gobierno de Colombia, 2021)

Según la Agencia Nacional de Minería, en el informe de producción de carbón a nivel nacional se registra 10’953,151.85 toneladas de carbón para el último trimestre del año 2020 y 22’031,665.00 libras níquel para la misma fecha, lo que indicarían grandes cantidades de relaves metálicos y no metálicos provenientes de la explotación de estos recursos.

4. Tecnologías de Tratamiento de Relaves

En la actualidad se utilizan diversas tecnologías para tratar o reciclar los relaves mineros, mediante estos tratamientos se puede llegar a minimizar los pasivos ambientales, ya que estas tecnologías buscan optimizar la disposición final que se le dará a estos residuos, modificando también sus propiedades y características, reduciendo el impacto que provocan sobre el medio ambiente, la contaminando al agua, suelo y el aire producida mediante erosión y por lo tanto protegiendo la población cercana a la zona (Beltrán et al., 2018; Jhosver Rodríguez & Ulloa, 2018).

Estos métodos o tecnologías de tratamientos se encuentran agrupados en la Tabla 4 donde se recopilan investigaciones realizadas por diferentes autores, organizada de forma cronológica y separado por su país de origen o continente, además del método usado para tratar el relave. Los métodos usados son separados entre los pertenecientes a beneficio de minerales, hidrometalurgia, pirometalurgia y otros, entre los métodos usados está la micro encapsulación del relave, este consiste en crear un revestimiento inerte, que ha probado ser un tratamiento excelente para residuos tóxicos con metales, logrando estabilizar los metales y contaminantes mitigando la exposición al medio ambiente (Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017).

Otra tecnología emergente usada para el manejo de los relaves es el retrollenado de minas, el cual es un proceso que usa residuos mineros combinados con pequeñas cantidades de cemento o roca estéril para estabilizar galerías, permitiendo extraer los minerales adyacentes por completo y así mismo aminorando el uso de superficies para la disposición de estos residuos, estos tratamientos están relacionados con la protección del medio ambiente, pero también con un beneficio económico (Beltrán et al., 2018).

Tabla 4

Tecnologías y tratamientos de relaves

Método	Colombia	Perú	Otros países de América	Europa	Asia
Beneficio de minerales	- (Durán & Galvis, 2014)- (Beltrán et al., 2018) - (Hernández, 2019)	-(Merma & Churata, 2015) -(Gutiérrez, 2018) - (Jhosver Rodríguez & Ulloa, 2018) - (Valdez Loaiza et al., 2020)	-(Jácome Calderón, 2020) - (Araya et al., 2020)	- (Perumal et al., 2020)	- (Saedi et al., 2020)

Hidro metalurgia	- (José Rodríguez et al., 2018)		-(Araya et al., 2020)	- (Manca et al., 2021)	- (Zhang et al., 2014)-(Saedi et al., 2020)
Piro metalurgia	- (Rincón Rincón & Garzón Cadena, 2018)	- (Valdez Loaiza et al., 2020)	- (Terry Lay et al., 2009)-(Salguero & Coral, 2017) - (Araya et al., 2020)	- (Perumal et al., 2019)	- (Jiao et al., 2011) - (Ye et al., 2017) - (H. Li et al., 2021)
Otros	- (Jaramillo & Zapata, 2008) - (Rincón Rincón & Garzón Cadena, 2018) - (Pardo Álvarez, 2019)	- (Calderon Soncco & Umiñaa Quispe, 2015) - (Merma & Churata, 2015) - (J. López et al., 2010) - (Merma & Churata, 2015) - (Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017) -(Gutiérrez, 2018)	- (Vargas & Lopez, 2018) - (Xie & van Zyl, 2020) - (Lebron et al., 2020)	- (Instituto cerdá, 2012) - (Almeida et al., 2020) - (Karhu et al., 2020)	-(C. Li et al., 2010) - (Saedi et al., 2020)

Nota. Recopilación de artículos sobre tecnologías y tratamientos para relaves separados por su métodos y país o continente en el cual se realizó el artículo.

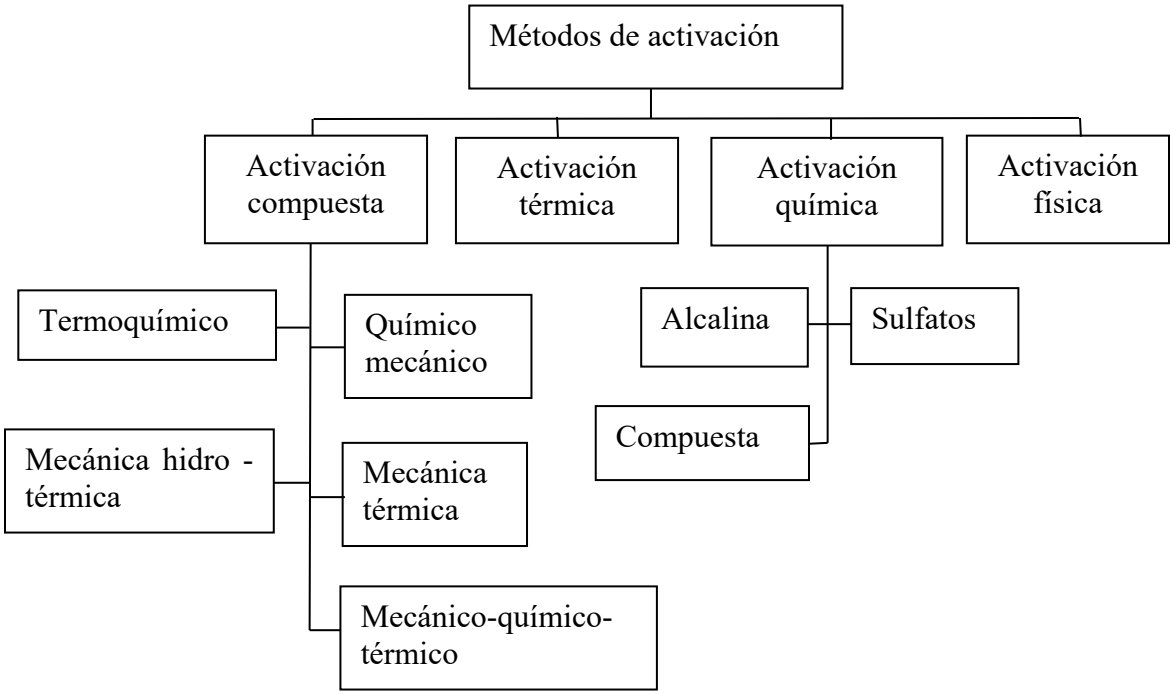
4.1 Método de activación de relaves mineros

En la mayoría de los casos para poder hacer uso de los residuos mineros es necesario aplicar métodos que permitan modificar el relave, de manera que sea posible el uso de este, como se observó en la Tabla 2 y 3, los relaves poseen componentes que pueden ser peligrosos y que pueden formar efluentes de minerales ácidos y metales pesados, el uso de estos sin un previo tratamiento conduciría a la posible liberación de contaminantes al medio ambiente causado daños a la salud, por esta razón es usado en muchas ocasiones el método de activación, el cual permite inmovilizar elementos tóxicos presentes en el relave, además este método aumenta las propiedades cementosas del residuo, lo que hace posible utilízalo en algunos casos como sustituto de cemento, reduciendo

el riesgo a la contaminación, el uso de espacio para su disposición y la producción de gases de efecto invernadero que se generan en la elaboración del cemento, además mediante el uso de este método se genera un valor agregado al relave (Calderon Soncco & Umiñaa Quispe, 2015; Saedi et al., 2020). En la figura 6 se pueden observar los distintos métodos de activación que se pueden usar según sea conveniente para cada tipo de relave, entre estos se encuentran los métodos de activación compuesta, térmica, química y física.

Figura 6

Esquema de métodos de activación.



Nota. Esquema con recopilación de métodos de activación. Tomado de (Saedi et al., 2020)

La activación de los relaves debe realizarse según los compuestos y las características que posea el residuo minero, se debe elegir el método correcto para obtener los resultados deseados, los métodos de activación se encuentran señalados en la Figura 6, como ejemplo el método de activación de los relaves de cobre es el mecánica térmico, el cual hace referencia a una activación

compuesta (Vargas & Lopez, 2018), para relaves de cobre-zinc se requiere activación química, al igual que para los relaves de tungsteno (Saedi et al., 2020).

4.2 Tecnologías comunes en el tratamiento de relaves mineros

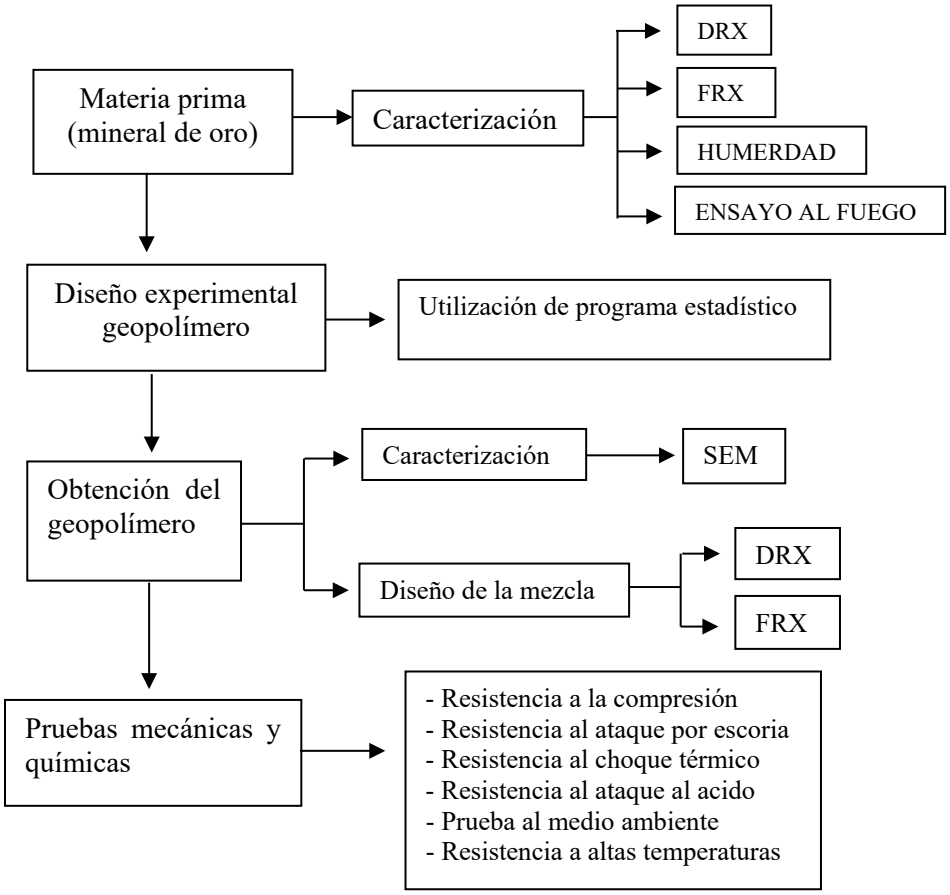
4.2.1 Geopolimerización

Alrededor del mundo se implementan diversas técnicas para la recuperación y tratamientos de relaves mineros, entre estos tratamientos hay algunos que se usan más y de los cuales se encuentran más registros bibliográficos, entre estas tecnologías está la fabricación o síntesis de geopolímeros, este consiste en crear un material cementante compuesto de grupos alumino-silicatos; en la geopolimerización se usa el método de activación alcalina, el cual hace parte de la activación química (Figura 6) (Durán & Galvis, 2014; Ye et al., 2017). Los geopolimeros se puede sintetizar usando como fuentes diferentes materiales como, minerales, rocas volcánicas, arcilla, mezclas de materiales y desechos industriales (Calderon Soncco & Umiñaa Quispe, 2015; Durán & Galvis, 2014).

Las investigaciones mencionadas sobre geopolimeros en este trabajo (Tabla 5) están enfocadas en la creación de estos, usando como base principal relaves o usando estos residuos en mezclas para su fabricación. En la Figura 7 se observa un diagrama de flujo que muestra un desarrollo experimental de un geopolimero creado a partir de relaves provenientes de una mina de mina de oro en Vetas, Santander.

Figura 7

Diagrama de flujo sobre la obtención de un geopolimero.



Nota. Procedimiento de la obtención de un geopolimero para ser usado como material de construcción. Tomado de (Duarte Duran & Piñeros Pirazán, 2017)

El procedimiento consiste en crear una mezcla con estos materiales, la cual tenga las proporciones adecuadas que generen las propiedades óptimas para su uso, a la mezcla se le realiza un proceso de curado con el fin de obtener un geopolímero funcional (Calderon Soncco & Umiñaa Quispe, 2015; Durán & Galvis, 2014; Gutiérrez, 2018; Merma & Churata, 2015)

4.2.2 Vitrificación

La vitrificación, consiste en someter el relave seco a temperaturas elevadas acompañado de vidrio en polvo y un fundente como el bórax, este tratamiento permite inertizar los relaves, ya que la vitrificación cumple la función de reducir la posible lixiviación de sustancias tóxicas, al alcanzar temperaturas elevadas permite que su estructura sea capaz de incorporar metales pesados, esta técnica también busca reutilizar residuos que no tiene un correcto proceso de descarte, como es el caso del vidrio y corto punzantes hospitalarios (Salguero & Coral, 2017).

Se ha comprado que el método de vitrificación es eficaz para convertir desechos radioactivos, desechos industriales, relaves, entre otros, en productos útiles, permitiendo estabilizar, disminuir y reciclar, dando un valor agregado al proceso (Terry Lay et al., 2009).

4.2.3 Eliminación de cianuro (Proceso INCO)

La eliminación del cianuro del relave, producto de la cianuración del oro mediante el proceso INCO, se realiza por medio de la inyección de dióxido de azufre y aire, el cual oxida el cianuro libre y el cianuro WAD, utilizando como catalizador los iones de cobre, lo cual logra reducir casi por completo el cianuro presente y baja en gran medida las concentraciones de otros metales como el cobre, zinc, hierro y níquel, generando así un efluente con menos materiales tóxicos y reduciendo la contaminación de cianuro (J. López et al., 2010).

5. Productos a Partir de Relaves Mineros

Las tecnologías de tratamiento dan la oportunidad de generar productos a partir de relaves mineros, los cuales son utilizados no solo para mitigar los impactos ambientales, la problemática del espacio disponible, sino también para generar un ingreso adicional y alentar un nuevo rubro

laboral (Merma & Churata, 2015). En la tabla 5 se encuentra una recopilación de investigaciones realizadas a la creación de productos que pueden ser obtenidos a partir de relaves mineros, entre los que se encuentra la fabricación de adoquines, ladrillos, baldosas, geopolimeros, cementos, materiales destinados a la fabricación de vías, entre otros. La intención de la sintetización de la tabla es facilitar el acceso a los diferentes artículos que aportan una alternativa útil en cuanto al tratamiento y disposición de estos pasivos ambientales, la información se encuentra ubicada en orden cronológico, con el fin de visualizar la evolución de procesos y productos.

Tabla 5

Productos elaborados a partir de relaves mineros

Productos	UIS	Otras universidades	Empresas	Total
Geopolímeros	- (Durán & Galvis, 2014)	- (Calderon Soncco & Umiñaa Quispe, 2015) - (Merma & Churata, 2015) - (Vargas & Lopez, 2018) - (Gutiérrez, 2018) - (Pardo Álvarez, 2019) - (Perumal et al., 2019)	- (Jiao et al., 2011) - (Ye et al., 2017)	9
Material de vías		- (Jhosver Rodríguez & Ulloa, 2018) - (Gutiérrez, 2018) - (Pardo Álvarez, 2019) - (Saedi et al., 2020)		4
Adoquines, ladrillos y baldosas	- (Florez Gerez, 2009)	- (J. López et al., 2010) - ((Salguero & Coral, 2017) - (Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017) - (Rincón Rincón & Garzón Cadena, 2018) - (Jácome Calderón, 2020) - (Valdez Loaiza et al., 2020)	- (Vargas & Lopez, 2018)	6
Otros	- (Carrillo Bonilla, 2013) - (Jimenez Alfaro, 2014)	- (Jaramillo & Zapata, 2008) - (Zhang et al., 2014) - (Beltrán et al., 2018) - (José Rodríguez et al., 2018) - (Hernández, 2019) - (Almeida et al., 2020) - (Karhu et al., 2020)	- (Terry Lay et al., 2009) - (Adasme Aguilera et al., 2010) - (Instituto cerdá, 2012) - (H. Li et al., 2021)	14

	- (Araya et al., 2020) - (Perumal et al., 2020)

Nota. Recopilación de productos elaborados a partir de relaves minero. Adaptado de los artículos mencionados en la a lo largo de la tabla.

5.1 Geopolímeros

La fabricación o síntesis de geopolímeros es una de las tecnologías ya mencionadas, la cual logra crear un material resistente a la compresión que puede ser utilizado para la construcción, entre los materiales que pueden ser fabricados están los morteros de geopolimeros, que pueden estar construidos por la parte continua geopolimérica y otra dispersa compuesta de arena fina, creando un material que supera las resistencias requerida para su uso (Gutiérrez, 2018), la creación de elementos prefabricados a base de geopolimeros también se ha investigado en los últimos años, elementos como tuberías, vigas, pavimentos, paneles de madera a prueba de fuego, ladrillos pisos industriales, he incluso tanques de aguas residuales(Merma & Churata, 2015), en la Figura 8 se observa una probeta de hormigón realizada a partir de un geopolimero.

Figura 8

Hormigón geopolimero a partir de relaves.



Nota. Fabricación de un hormigón de geopolimero creado con relaves. Tomado de (Apablaza Veas, 2015)

En la actualidad se busca ampliar el uso de materiales reciclables mezclándolos con cementos rutinarios, esto con el fin de minimizar las emisiones de gases tóxicos creados en la fabricación del cemento tradicional, siendo estos cementos alternativos superiores en propiedades mecánicas y resistentes a la compresión y al fuego, siendo aptos para sustituir los cementos convencionales (Durán & Galvis, 2014; Pardo Álvarez, 2019).

5.2 Materiales para la construcción de vías

El uso de los relaves de arenisca, graba y rocas generados de la explotación de canteras a cielo abierto han resultado útiles en el relleno de carreteras y vías, en otros ensayos realizados se demuestra que al sustituir el agregado fino por relaves mineros se obtienen resultados favorables para la elaboración de concretos usados en vías de bajo tránsito (Rincón Rincón & Garzón Cadena, 2018; Jhosver Rodríguez & Ulloa, 2018)

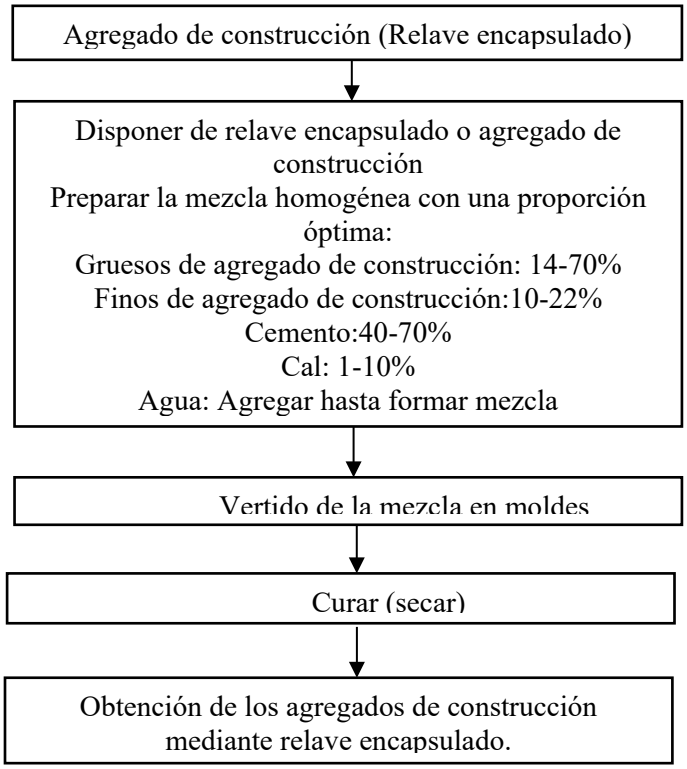
5.3 Fabricación de adoquines, ladrillos y baldosas

La fabricación de bloques, ladrillos, tejas, baldosas y otros elementos fabricados a partir de los residuos dejados por la minería, han tomado fuerza en los últimos años, esto es posible observarlo en la Tabla 5 donde se denota el incremento de investigaciones enfocadas en el desarrollo de estas alternativas. Para la fabricación de estas piezas es posible implementar diversos procesos, esto dependerá del tratamiento que requiera el relave y del producto final al que se desea llegar, entre las tecnologías ya mencionadas está el uso de geopolimeros y la encapsulación del relave para la elaboración de adoquines, ladrillos y baldosas (Gutiérrez, 2018; Pardo Álvarez, 2019; Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017), en la figura 9 se observa un esquema donde se explica la elaboración de ladrillos usando relaves encapsulados. Por otro lado también es posible usar la eliminación del cianuro del relave producto de la cianuración del oro, esto mediante el

proceso INCO, el cual nos permite obtener un material con bajos valores de metales con el cual se pueden obtener baldosas (J. López et al., 2010).

Figura 9

Esquema de obtención de ladrillos a partir de relaves mineros.



Nota. El esquema muestra el procedimiento de obtención de ladrillos a ártir de relaves por medio de metodo de encapsulamiento.Tomado de (Flores et al., 2012)

El uso de relaves sin un tratamiento previo también es posible, análisis físicos, mineralógicos y químicos pueden indicar si el residuo es acto y seguro para usarlo en la fabricación de productos de manera inmediata, en la Figura 10 se observa un producto derivado de este proceso, donde se usó residuo minero para la elaboración de ladrillos (Jácome Calderón, 2020).

Figura 10

Ladrillos obtenidos a partir de relave.



Nota. Ladrillos a partir de relaves, no se usó un tratamiento previo para la implementación del relave. Tomado de (Smoll et al., 2020).

La fabricación de adoquines o la elaboración de bloques de concreto y ladrillos, entre otros productos, remplazando simplemente el polvo de piedra o agregado fino con relaves mineros, pueden ser usados en la construcción de viviendas o vías, disminuyendo la extracción de materiales vírgenes, permitiendo reciclar residuos que de otra manera serian desechados o almacenados permanentemente, (Jácome Calderón, 2020; Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017; Valdez Loaiza et al., 2020).

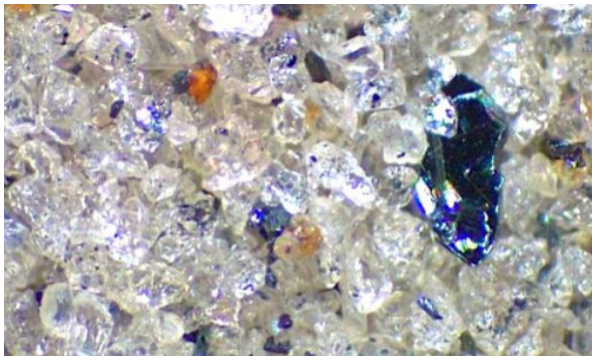
5.4 Otros productos fabricados a partir de residuos mineros

Otros productos además de baldosas, tejas y cemento pueden ser fabricados a partir de relaves, los vidrios con potencial comercial fabricados a partir de la técnica de vitrificación es una alterativa cada vez más estudiada, como se explicó anteriormente este proceso lograr una inertización de los relaves, al realizar la vitrificación permite que su estructura sea capaz de incorporar metales pesados, volviéndolo un material seguro para su uso (Terry Lay et al., 2009). La espuma de vidrio es otro producto valioso que puede ser creado a partir de residuos mineros,

esta es usada en construcción como aislante térmico y acústico, en la Figura 11 se observa una imagen a microscopio de la espuma de vidrio formada a partir de relaves mineros.

Figura 11

Muestra espumas de vidrio a partir de relaves mineros (Honrubia, 2019)



Nota. Imagen a microscopio de una espuma de vidrio fabricada a partir de relaves mineros.

Los revestimientos cerámicos fabricados a partir de residuos de minería como materia prima para aglomerados pulverizados, también es una alternativa de aprovechamiento de relaves procedentes de minas de talco, generando un material dieléctrico por lo que puede ser usado como aíslate, el procedimiento para la elaboración del cerámico consiste en el secado por pulverización y posterior Sintetización por reacción del relave (Karhu et al., 2020).

En la siguiente tabla se recopila parte de la base de datos compuesta por los diferentes artículos usados para el desarrollo de este trabajo, de manera que se nombran los documentos más completos en cuanto al avance de las alternativas y tecnologías usadas para reciclar y minimizar el impacto de los pasivos ambientales, como también de los conceptos esenciales para comprensión de la temática. La Tabla 6 está dividida entre las fuentes usadas para encontrar la información y los temas de interés, y al igual que las tablas anteriores se encuentra organizada según su año de publicación.

Tabla 6

Base de datos usada y temas de interés

Base de datos	ScienceDirect	Google académico	Otras fuentes	Total
Pasivos ambientales		- (Chaparro, 2007) - (Adasme Aguilera et al., 2010) - (Friess & Brotz, 2011) - (Duarte Duran & Piñeros Pirazán, 2017)	- (Minas y energía & Medio ambiente, n.d.) - (Oblasser, 2016) - (M. López et al., 2018) - (Arango & Olaya, 2012) - (Smoll et al., 2020)	8
Tratamientos relaves mineros	- (C. Li et al., 2010) - (Jiao et al., 2011) - (Ye et al., 2017) - (Saedi et al., 2020) - (Almeida et al., 2020)	- (Terry Lay et al., 2009) - (Merma & Churata, 2015) - (Vargas & Lopez, 2018)	- (Merma & Churata, 2015)	9
Productos de relaves mineros	-(Vargas & Lopez, 2018) - (Perumal et al., 2019) - (Almeida et al., 2020) - (Karhu et al., 2020) - (Perumal et al., 2020) - (Pactwa et al., 2020)	- (Jaramillo & Zapata, 2008) -(Flores et al., 2012) - (Instituto cerdá, 2012) - (Rincón Rincón & Garzón Cadena, 2018) - (José Rodríguez et al., 2018) - (Hernández, 2019) - (Pardo Álvarez, 2019)	- (J. López et al., 2010) - (Calderon Soncco & Umiñaa Quispe, 2015) - (Rojas Huamaní & Ventura Huaman, 2017) - (Gutiérrez, 2018) - (Jácome Calderón, 2020) - (Valdez Loaiza et al., 2020)	19
Otras alternativas para los relaves mineros	- (Zhang et al., 2014) - (Araya et al., 2020) - (Lebron et al., 2020) - (Barcelos et al., 2020) - (H. Li et al., 2021) - (Manca et al., 2021)	- (OruÇ & Sabah, 2006) - (Xie & van Zyl, 2020)	- (Durán & Galvis, 2014) - (Jhosver Rodríguez & Ulloa, 2018) - (Beltrán et al., 2018)	11

Nota. Recopilación de parte de la base de datos usada para la investigación, los artículos mencionados contienen los temas de interés.

6. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica realizada a las alternativas de recuperación y reciclado de los relaves mineros, es posible evidenciar un incremento en el interés y desarrollo con el paso del tiempo, registrándose un aumento significativos en la cantidad de artículos desarrollados en los últimos años, no solo enfocados en la creación de productos a partir de residuos, sino también en la evolución e identificación de los conceptos relacionados a los pasivos ambientales, lo cual presenta una ventaja y refleja un mayor compromiso con la búsqueda de soluciones permanentes que permitan contrarrestar el impacto que conlleva este sector del proceso minero. Al revisar los datos del sector minero en Colombia, por medio de las diferentes entidades que competen a esta industria, fue posible evidenciar que no se lleva un correcto registro de las minas en el territorio nacional, lo que dificulta obtener información sobre los derivados de las etapas del proceso minero, pese a la relevancia que este sector representa para la economía del país, presentando una debilidad con respecto a la seguridad y cuidado del entorno, ya que se exhibe una ausencia de legislación eficiente que haga responsable a las instituciones que forman parte de esta industria.

El problema ambiental en Colombia empeora a su vez a causa de la informalidad de un gran número de minas ilegales en el territorio que no cuentan con ningún tipo de precauciones, agravando el impacto ambiental. Por lo anterior la ausencia de documentación presenta una gran dificultad para la población científica nacional a la hora de desarrollar o proponer nuevas tecnologías o alternativas que permitan minimizar la huella ambiental dejada por el proceso minero, ya que no es posible obtener información concreta de los derivados consecuentes de los diferentes procesos mineros.

Por medio de la caracterización de los relaves minero de los diferentes tipos de minas es posible evidenciar la presencia de compuestos aprovechables que ofrecen una oportunidad de beneficio, también se permite constatar que el contenido de cada relave variará con resto a otro, aunque se esté explotando el mismo mineral, ya que prevalece las cualidades del terreno y el método usado para la extracción. Colombia cuenta con una amplia riqueza mineralógica, lo que ofrece la posibilidad de la aplicación y desarrollo de las alternativas de reciclaje de los diferentes pasivos ambientales.

Los métodos y alternativas más comunes para recuperación y reciclado de los relaves son sintetizados en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, por medio de la investigación se logró ver que en países en los cuales la minería representa un sector importante en la economía de la nación, como es el caso de Perú, se observa un mayor desarrollo e interés en la elaboración de alternativas envolviendo diferentes técnicas que permitan aprovechar los relaves mineros o reducir el impacto que estos pueden presentar para el medio ambiente y las poblaciones cercanas, siendo de los métodos investigados los más usados la activación, geopolimerización y la creación de materiales para construcción, tales como: baldosas, ladrillos, tejas y cemento.

En el proyecto se presentaron diferentes tipos de flujogramas que permiten esquematizar los pasos requeridos para la elaboración un método de aprovechamiento de los relaves mineros, como también de las diferentes tecnologías de activación, minimizando el factor contaminante presente en los relaves. En Colombia en los últimos años se ha visto un incremento en el interés por parte de la comunidad a la investigación de alternativas que permitan combatir las consecuencias que conllevan los procesos mineros, aún falta un largo camino por recorrer en el control eficiente de este sector que ofrezca una mayor claridad, como también en la aplicación de tecnologías o alternativas de recuperación que reduzcan el impacto sobre el territorio nacional.

8. Recomendaciones

Se recomienda continuar con la revisión del estado de arte de las tecnologías específicas desde el punto de vista ambiental y económico, ya que de esta manera se podrá tener una visión más objetiva sobre qué le ofrecen estas alternativas a la industria, de forma que funcionen como un incentivo para su aplicación y desarrollo en el territorio colombiano.

Referencias Bibliográficas

Adasme Aguilera, C., Arranz González, J. C., Valladares Salinas, R., Fidel Smoll, L., Loaiza Choque, L. E., Arceo, L., De los Santos Montaño, J. de jesús, Perez Acosta, G. R., & Lapido Barzi, O. R. (2010). MANUAL PARA EL INVENTARIO DE MINAS ABANDONADAS O PARALIZADAS. *PASIVOS AMBIENTALES MINEROS: HACIA UNA GESTIÓN SOSTENIBLE. VISIÓN GLOBAL EN IBEROAMÉRICA*.

Almeida, J., Faria, P., Ribeiro, A. B., & Santos Silva, A. (2020). Effect of mining residues treated with an electrodialytic technology on cement-based mortars. *Cleaner Engineering and Technology*. https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100001

Apablaza Veas, J. A. (2015). *Caracterización De Polimeros Naturales Fosfo-Siliciclásticos Para Aplicaciones En La Industria De La Construcción*. Universidad Austral de Chile, Facltad de Ciencias de la Ingeniería.

Arango, M., & Olaya, Y. (2012). *Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia*. 124–133.

Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, *263*(January 2019), 121555. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555

Barcelos, D. A., Pontes, F. V. M., da Silva, F. A. N. G., Castro, D. C., dos Anjos, N. O. A., & Castilhos, Z. C. (2020). Gold mining tailing: Environmental availability of metals and human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, *397*(April), 122721. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122721

Base de datos Gobierno de Colombia. (2021). *RESUMEN MINERIA COLOMBIA*. *Datos Abiertos Colombia*.

Beltrán, L., Larrahondo, J., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, *44*, 5–20. https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617

Calderon Soncco, V., & Umiñaa Quispe, Y. (2015). Evaluacion de concretos geopolimericos mediante activacion alcalina de residuos mineros (relave) y zeolita natural [Universidad Nacional de San Agustin]. In *Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa*. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/222

Carrillo Bonilla, M. L. (2013). *Recuperación de los hidrocarburos presentes en los residuos y pasivos ambientales generados por las actividades propias de la industria petrolera por medio de desorción térmica* [Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenieria de Petroleos.]. https://uids-primo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=uids_bucaramanga165218&context=L&vid=UIDS&lang=es_CO&search_scope=uids_completo&adaptor=Local Search Engine&tab=uids_tab&query=any,contains,pasivos ambientales&facet=domain,includ

Chaparro, E. (2007). *Definicion PAM otros paises*. *7*(2), 1–16.

Duarte Duran, C. A., & Piñeros Pirazán, H. D. (2017). Implementación de una metodología para la identificación y evaluación de pasivos ambientales mineros [UNIVERSIDAD DE LA SALLE]. In *Ciencias Unisalle*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/89/

Durán, J., & Galvis, D. (2014). *Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de relaves mineros auriferos*. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

ElTiempo. (2016). *Hallan minas ilegales en reserva forestal del sur de Bolívar*.

https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16640477

Flores, S., Tinoco, O., Zegarra, E., & Mc, D. (2012). *REUSO DE RELAVES MINEROS COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE AGREGADOS DE CONSTRUCCIÓN PARA FABRICAR LADRILLOS Y BALDOSAS*.

Florez Gerez, D. A. (2009). *Obtención de un material cerámico de construcción a partir de las escorias del proceso de coquización del carbón* [Universidad Industrial de Santander]. https://uids-primo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=uids_bucaramanga151222&context=L&vid=UIDS&lang=es_CO&search_scope=uids_completo&adaptor=Local Search Engine&tab=uids_tab&query=any,contains,material de construcción&facet=domain,i

Friess, S., & Brotz, H. (2011). La Minería en los Países en Desarrollo. Desafíos y Propuestas de Acción. *Misereor*, 42. https://www.misereor.org/fileadmin/user_upload_misereororg/publication/es/documento-de-posicion-mineria-en-paises-desarollo.pdf

Gutiérrez, B. (2018). *Fabricación de morteros geopoliméricos ecoamigables a partir de residuos inorgánicos mineros como producto alternativo a morteros de cemento Portland* [Universidad Católica San pablo]. http://repositorio.ucsp.edu.pe/handle/UCSP/15575

Guzmán Martínez, F., Arranz González, J. C., Smoll, L., Collahuazo, L., Calderón, E., Otero, O., & Arceo y Cabrilla, F. (2020). Pasivos ambientales mineros: Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. *Asociación de Servicios de Geología de Minería Iberoamericanos*, 52. https://asgmi.org/wp-content/uploads/2020/06/Manual-Inventario-PAM-y-Anexos.pdf

Hernández, J. (2019). *Aprovechamiento De Residuos De Minería De Esmeraldas Aplicando Una*

Alternativa Socio-Económica Y Cultural Para Aportar En La Minimización Del Impacto Ambiental Ocasionado En Cercanías Al Municipio De Muzo Departamento De Boyacá – Colombia. 53(9), 1689–1699.

Honrubia, M. (2019). *Espuma de vidrio*. Ennomotive. https://www.ennomotive.com/es/desafio-relaves-mineros

Instituto cerdá. (2012). *Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en españa*.

Jácome Calderón, J. F. (2020). *Desarrollo de adoquines a partir de los relaves de mina de la empresa minera "Agro-Industrial el Corazón."* Universidad Central del Ecuador.

Jaramillo, G., & Zapata, L. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. univerisdad de Antioquia, Especialidad en gestión ambiental.

Jiao, X., Zhang, Y., Chen, T., Bao, S., Liu, T., & Huang, J. (2011). Geopolymerisation of a silica-rich tailing. *Minerals Engineering*, *24*(15), 1710–1712. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.008

Jimenez Alfaro, A. D. (2014). *Modelo matemático para evaluar el impacto de los pasivos ambientales en la mina la bodega en california, Santander* [Universidad Industrial de Santander]. https://uids-primo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=uids_bucaramanga168177&context=L&vid=UIDS&lang=es_CO&search_scope=uids_completo&adaptor=Local Search Engine&tab=uids_tab&query=any,contains,pasivos ambientales&facet=domain,includ

Karhu, M., Lagerbom, J., Honkanen, M., Huttunen-Saarivirta, E., Kiilakoski, J., Vuoristo, P., Solismaa, S., & Kivikytö-Reponen, P. (2020). Mining tailings as a raw material for glass-bonded thermally sprayed ceramic coatings: Microstructure and properties. *Journal of the European Ceramic Society*, *40*(12), 4111–4121.

https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.038

Lebron, Y. A. R., Moreira, V. R., Drumond, G. P., da Silva, M. M., Bernardes, R. de O., Santos, L. V. de S., Jacob, R. S., Viana, M. M., & de Vasconcelos, C. K. B. (2020). Graphene oxide for efficient treatment of real contaminated water by mining tailings: Metal adsorption studies to Paraopeba river and risk assessment. *Chemical Engineering Journal Advances*, *2*(August), 100017. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100017

Li, C., Wan, J., Sun, H., & Li, L. (2010). Investigation on the activation of coal gangue by a new compound method. *Journal of Hazardous Materials, ELSEVIER*, *179*(1–3), 515–520. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.033

Li, H., Peng, J., Ma, P., Zhou, Z., Long, H., Li, S., & Zhang, L. (2021). Application of diagnostic roasting method in thermochemical treatment for Au recovery from gold-containing tailings in microwave field. *Minerals Engineering*, *163*(June 2020), 106773. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106773

López, J., Velazco, E., Revilla, P., Medina, H., Zamata, E., Zúñiga, H., Arenas, M., Salazar, B., Laureano, D., & Rivas, E. (2010). IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA (PROTOTIPO) PARA LA OBTENCIÓN DE BALDOSAS A PARTIR DE RELAVES MINEROS EN LA REGIÓN AREQUIPA. *Universidad Católica San Pablo*.

López, M., López, L., & Medina, G. (2018). *La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica *. 13*(1), 78–91. http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138

Manca, P. P., Massacci, G., Pintus, D., & Sogos, G. (2021). The flotation of sphalerite mine tailings as a remediation method. *Minerals Engineering*, *165*(February), 106862. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106862

Medvinsky-Roa, G. ;Caroca, V; Vallejos, J. (2015). Informe sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al consejo Económico Social de la Naciones Unidas. *Relave.Org.*, 1–23. https://tbinternet.ohchr.org/Treaties/CESCR/Shared Documents/CHL/INT_CESCR_CSS_CHL_20605_S.pdf

Merma, M., & Churata, R. (2015). *Obtención de geopolimerosa partir de relave minero de cobre con ceniza volante y metacaolin* (Issue Tesis para optar por el titulo profesional: Ingeniería Metalúrgica). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Minas y energía, M. de, & Medio ambiente, M. del. (n.d.). *Guía Minero ambiental*.

Oblasser, A. (2016). Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras. *Cepal*, 1–107. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40475

OruÇ, F., & Sabah, E. (2006). Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings. *IMPC 2006 - Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress*, *January 2006*, 1192–1198.

Pactwa, K., Woźniak, J., & Dudek, M. (2020). Coal mining waste in Poland in reference to circular economy principles. *Fuel*, *270*(February). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117493

Pardo Álvarez, N. S. (2019). *DESARROLLO DE CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE A PARTIR DE RESIDUOS SÍLICO-ALUMINOSOS, COMO ALTERNATIVA PARA LA DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL SECTOR CONSTRUCTOR*. Universidad de Antioquia.

Perumal, P., Niu, H., Kiventerä, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2020). Upcycling of

mechanically treated silicate mine tailings as alkali activated binders. *Minerals Engineering*, *158*(March), 106587. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106587

Perumal, P., Piekkari, K., Sreenivasan, H., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2019). One-part geopolymers from mining residues – Effect of thermal treatment on three different tailings. *Minerals Engineering*, *144*(February), 106026. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106026

Rincón Rincón, D. A., & Garzón Cadena, F. V. (2018). *Propuesta para el manejo ambiental de los lodos resultantes de la explotación de areniscas en la vereda Modeca del municipio Corrales, Boyacá* [Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/

Rodríguez, Jhosver, & Ulloa, F. (2018). INFLUENCIA DE LA SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO FINO POR RELAVE MINERO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD DE UN CONCRETO DE BAJO TRÁNSITO, PARCOY - LA LIBERTAD - 2018. In *Ucv*.

Rodríguez, José, Tobón, J., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. I. (2018). Aprovechamiento de un residuo del carbón para reducción del impacto ambiental de la minería del carbón en Colombia: estudio del potencial de uso en la industria del cemento. *Revista CINTEX*, *23*(2), 95–102. https://doi.org/10.33131/24222208.323

Rodríguez, R., Londoño, J., Garzón, E., Forero, J., Manrique, J., Rojas, F., & Rojas, F. (2009). *El níquel en Colombia. UPME* (Unidad de, p. 41). http://www.upme.gov.co/Docs/Niquel_Colombia.pdf

Rojas Huamaní, L. E., & Ventura Huaman, L. E. (2017). Utilización del relave minero para la elaboración de bloques de concreto tipo ensamblable [Universidad Nacional de Huancavelica]. In *Universidad Nacional de Huancavelica*.

http://181.65.181.124/handle/UNH/1326

Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Khodadadi, A. (2020). A review on different methods of activating tailings to improve their cementitious property as cemented paste and reusability. *Journal of Environmental Management*, *270*(February), 110881. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110881

Salguero, K., & Coral, K. (2017). *Inertización de relaves mineros utilizando la vitrificación para su aprovechamiento en la construcción "* [Universidad Internacional SEK]. https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3086/1/tesis kimberly salguero.pdf

Smoll, L. F., Arranz, J. C., Guzman Martinez, F., Acero, F., Prazeres, C., & Calderon, E. (2020). GUIA PARA EL REPROCESAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS - ASGMI. In GEPAM (Ed.), *PASIVOS AMBIENTALES MINEROS: HACIA UNA GESTIÓN SOSTENIBLE. VISIÓN GLOBAL EN IBEROAMÉRICA*.

Terry Lay, G. F., Rockwell, M. C., Wiltshire, J. C., & Ketata, C. (2009). Characteristics of silicate glasses derived from vitrification of manganese crust tailings. *Ceramics International, ScienceDirect*, *35*(5), 1961–1967. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.10.035

Valdez Loaiza, J., Aguilar Franco, J., Sánchez Vargas, L., Alatrista Góngora, G., & Figueroa Dianderas, A. P. (2020). Design and implementation of an alternative process for the manufacture of bricks from gold mine tailings. *Ingeniare*, *28*(2), 268–276. https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200268

Vargas, F., & Lopez, M. (2018). Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings : Mechanical performance and analysis of factors. Univerisdad Catolica de Chile. *Journal of Cleaner Production*, *182*, 427–436. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.223

Xie, L., & van Zyl, D. (2020). Distinguishing reclamation, revegetation and phytoremediation, and the importance of geochemical processes in the reclamation of sulfidic mine tailings: A review. *Chemosphere*, *252*, 126446. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126446

Ye, J., Zhang, W., & Shi, D. (2017). Properties of an aged geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailing of bauxite and slag. *Cement and Concrete Research*, *100*(May), 23–31. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.017

Zhang, B., Liu, C., Li, C., & Jiang, M. (2014). A novel approach for recovery of rare earths and niobium from Bayan Obo tailings. *Minerals Engineering*, *65*, 17–23. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.011